

철도 차량용 고효율 횡축형 전동기 최적설계에 관한 연구

강도현, 방덕제
한국전기연구소

A Study on the Optimal Design of Linear Motor with Transverse Flux Configuration for Railway Traction System

D. H. Kang, D. J. Bang
KERI

Abstract - According to the development of power electronic element(GTO, IGBT) and material for electrical machines(permanent magnet, super conductor), the technology for electrical machines is now a day rapidly developing. Here with, a novel electrical machine, based on the new conception of transverse flux configuration leads to a considerable increase in power density and enables simultaneously high efficiency.

The transverse flux machine with PM excitation will be applied to gearless direct drives for railway traction system.

The designed and measured performance of transverse machine for railway traction system revealed a great potential of system improvements to reduce linear motor mass.

$$F_{xd} = B_o \frac{\theta_a}{2\tau_p} \frac{(h_1 - y)}{h_1} \quad (1)$$

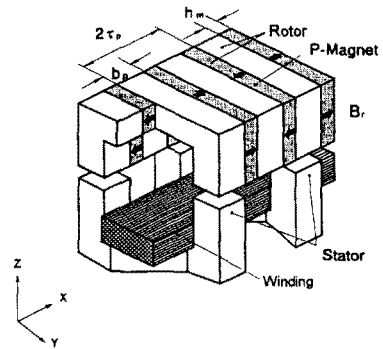


그림 1 영구자석 여자 횡축형 전동기 형상

1. 서 론

전력용 반도체(예 : GTO, IGBT)와 새로운 전기기 관련 재료(예 : 희토류 영구자석, 초전도체)의 발전에 따라 전기기기 기술이 비약적으로 발전되고 있다. 여기에 더불어 새로운 설계 개념을 도입한 새로운 형태의 횡축형 전동기가 개발되고 있다.

횡축형 전동기는 자속의 방향이 이동자의 이동 방향에 대해 횡방향을 나타내고 있으며, 또한 이동자와 같은 방향으로 전류가 흐른다. 횡축형 전동기는 극간격(τ_p)의 크기를 적게 설계가능하므로 높은 출력밀도를 얻을 수 있고, 오버행이 없는 링 형태의 권선으로 동의 양을 절약함으로써 효율이 높다. 횡축형 전동기는 높은 출력을 얻을 수 있기 때문에 특히 적은 전동기 중량이 요구되는 전기자동차, 철도관련 차량, 자기부상 열차와 같은 교통수단의 추진장치로 매우 적합하다[1].

특히 영구자석 여자 횡축형 전동기를 지하철 차량 혹은 경전철 차량의 선형 추진 시스템에 적용시킬 경우 일반 선형 유도전동기에 비해 3배 이상 높은 출력밀도를 얻을 수 있기 때문에 차량의 경량화, 지지구조의 경량화는 물론이고, 터널의 면적을 50 % 정도 절감 가능하다[2].

본 논문에서는 철도 차량용 영구자석 여자 횡축형 전동기를 설계하였고, 본 설계를 실험치와 비교하여 검증하였다.

2. 영구자석 여자 횡축형 전동기 이론

그림 1의 영구자석 여자 횡축형 전동기는 횡축형 전동기 기본모델에 출력밀도를 증가시키기 위해서 회전자에 영구자석을 삽입한 형태로, 영구자석에서 발생하는 자계는 공극에서 자계를 집중시키므로 높은 무부하 공극 자속밀도를 얻을 수 있다. 이때 발생가능 힘밀도 F_{xd} 는 식 (1)과 같다[3].

3. 철도차량용 횡축형 전동기 최적설계

횡축형 전동기의 형태는 전기자 권선의 위치, 회전자와 고정자의 형상에 따라 다양하게 설계가능하며, 그림 2는 철도차량에 적용가능한 선형 횡축형 전동기의 기본형태로 일반 재래식 차량에 비하면 기어없이 직접구동되기 때문에 기계적 부품을 줄이므로 경량화가 가능하며 추진과 제동시 바퀴의 마찰계수에 영향을 받지 않으므로 가속과 감속 성능이 좋고 지하철에 적용할 경우 터널의 면적을 50% 정도 감소시킬 수 있으며 건설비를 30% 이상 경감시킬 수 있는 장점이 있다. 선형 유도전동기 추진 철도 차량은 오오사카 지하철 12호선에서 이미 운행중이다. 그림 3의 철도차량용 영구자석 여자 횡축형 모델의 기본설계에서 선형 전동기를 철도차량에 적용시킬 경우, 기계적 공극이 적으면 유리하나 기계적 구조를 생각하여 일반적으로 공극 δ=10[mm], h₁=80[mm], 권선창 폭 b_{sp}=80[mm], 권선창 높이 h_{sp}=40[mm]로 선정하였다.

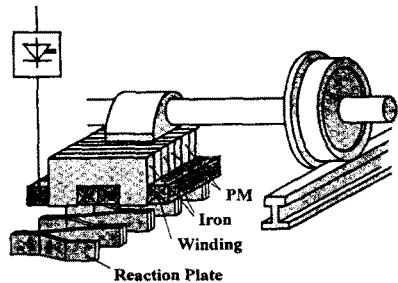


그림 2 철도차량용 선형 추진 System

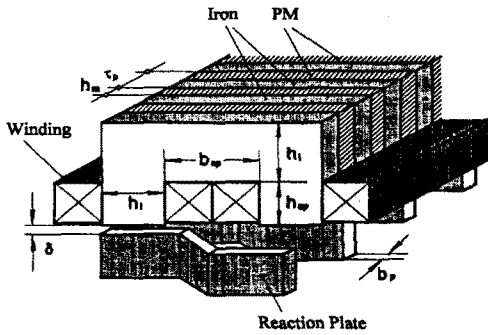


그림 3 철도차량용 영구자석여자 횡축형 전동기

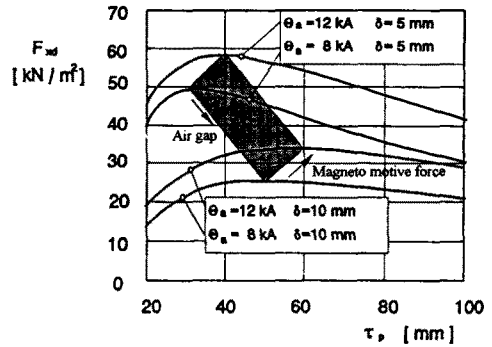


그림 5 극간격 τ_p에 대한 추진력 발생밀도 F_xd

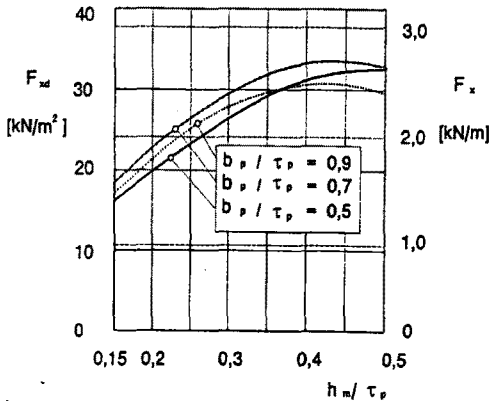


그림 4 레일 치폭 b_p와 전자석 두께 h_m에 대한 추진력 밀도 F_xd와 단위길이당 추진력 F_x

철도차량용 영구자석 여자 횡축형 전동기 사양으로 최적 설계시 주요 고려사항은 다음과 같다.

- 높은 추진력 $F_{xd} = f(\tau_p, b_p, h_m, \theta_a)$
- 낮은 흡인력 F_z
- 영구자석 재료 최소화

3차원 유한요소법으로 전자석 두께 h_m , 극간격 τ_p , 레일 치폭 b_p 의 값들을 최적화시켰다. 레일 치폭 b_p , 전자석 두께 h_m 의 변화에 대한 추진력과 흡인력을 우선 계산하였는데 b_p/τ_p 와 h_m/τ_p 의 비율 $0.5 \leq b_p/\tau_p \leq 0.9$ 와 $0.15 \leq h_m/\tau_p \leq 0.5$ 범위에서 변화시켰다.

그림 4에서 $b_p/\tau_p = 0.7$, $h_m/\tau_p = 0.425$ 일 때 최대의 추진력을 얻을 수 있다.

추진력 발생밀도 F_{xd} 는 극간격 τ_p 에 반비례하므로 τ_p 가 매우 적을 때 F_{xd} 는 무한대가 되나, 실제모델에서는 철심의 포화나 누설에 의해 추진력 발생밀도 F_{xd} 는 한계가 있다. 따라서 그림 5에서 $F_{xd} = f(\tau_p, \delta, \theta_a)$ 의 관계를 조사하였다.

최적 극간격 τ_{opt} 는 공극 δ 와 기자력 θ_a 가 증가함에 따라 커지고 τ_{opt} 는 $5[\text{mm}] \leq \delta \leq 10[\text{mm}]$, $8[\text{kA}] \leq \theta_a \leq 12[\text{kA}]$ 범위에서 식 (2)와 같다

$$\tau_{opt} \approx (40 \sim 60) [\text{mm}] = (4 \sim 6) \delta \quad (2)$$

표 1은 3차원 유한요소법에 의해 계산된 설계 전동기의 사양으로 효율은 동특성에서 계산하여야 하나, 정격 운전시 출력 198[kW], 동손 2.8[kW], 철손 3.25[kW]로 기계손을 무시할 경우 효율은 97%로 계산되었다.

표 1 설계 전동기 사양

설계 결과	
속도	100 km/h
전동기 출력	189 kW
기자력	12 kA
추진력	6.8 kN
전동기 무게	306 kg
추력밀도 F_{xd}	42.7 kN/m ²
추진력/전동기 무게	22.2 N/kg
공극 δ	10 mm
극간격 τ_p	60 mm
극폭 b_p	36 mm
전자석 높이 h_m	24 mm
극길이 h_i	80 mm
권선창 폭 b_{sp}	80 mm
권선창 높이 h_{sp}	40 mm
전동기 길이	1 m
점적율 k_{cu}	0.65
전류밀도 J	5.8 A/mm ²
효율 η	0.97

한편 그림 6은 설계된 영구자석 여자 횡축형 전동기와 자기 부상용 선형 유도전동기의 추력/전동기 무게 효율, 역률의 비교표를 나타내고 있다(4).

선형전동기의 설계 정격점에 따라 출력, 효율, 역률이 다르지만 도시형 자기부상열차 선형 유도전동기의 전동기 무게는 약 303[kg]이고 발생 추력은 2,000[N]으로 단위 무게당 추력은 약 6.6(N/kg)으로 효율과 역률은 60[%]이하이다.

그림 6의 특성에서 검토하면 선형 유도전동기는 큰 기계적 공극과 2차 도체 두께에 의해 약 15[mm]의 전기적인 공극 때문에 낮은 추력비, 효율, 역률을 가지고 있으며, 영구자석 여자 횡축형 전동기의 추력비가 약 4배임을 알 수 있다.

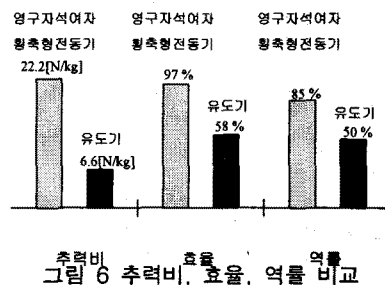


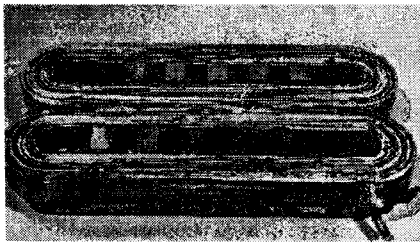
그림 6 추력비, 효율, 역률 비교

4. 전동기 제작 및 시험

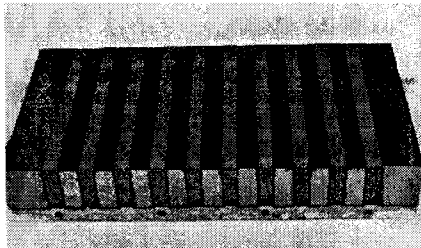
설계된 영구자석 여자 횡축형 전동기의 전자기적 설계의 타당성을 검증하기 위해 축소형 시험모델을 제작하여 추진력, 흡인력을 검증하였다. 표 2는 제작 선형모델의 주요 치수를 나타내고 있고, 그림 7은 각각 제작품을 나타내고 있다. 철심은 성층되지 않은 ST37을 사용하였고, 아래에 있는 2차 부분의 영구자석은 희토류 자석 ($B_r = 1.15T$)을 사용하였다.

표 2 시험용 선형모델 주요치수

	치 수
공극 δ	3 mm
극간력 τ_p	17 mm
극폭 b_p	10 mm
전자석 높이 h_m	7 mm
극길이 h_i	24 mm
권선장 폭 b_{sp}	57 mm
권선장 높이 h_{sp}	27 mm
1차 치수	230mm(길이)×159mm(폭)×54mm(높이)
2차 치수	200mm(길이)×105mm(폭)×24mm(높이)
권선수	195×2
권선 치수	3.55mm(폭)×0.8mm(높이)



a) 1차



b) 2차

그림 7 제작 시제품의 1차와 2차

그림 8에는 이동자 위치에 따른 추진력과 흡인력의 계산값과 시험값을 나타내었는데 시험결과 최대 추진력을 발생시키는 x/τ_p 의 위치가 $x/\tau_p = 0.5$ 지점으로 이동하고 있으며, $x/\tau_p = 0$ 인 지점에서 흡인력이 계산값보다 크게 나타나 있는데 이는 영구자석의 등가기자력이 시험기 제작과정에서 감소됨을 알 수 있다.

그림 9는 시험기에서 공극 $\delta = 2, 3, 4$ [mm]에 대해 기자력 0[kA]에서 5.4[kA]까지 변화할 때 추력밀도의 계산값과 시험값을 나타내고 있는데 12~17% 범위에서 추력밀도가 감소되고 있다. 공극 $\delta = 3$ [mm], 기자력 $\theta_a = 3.6$ [kA] 일 때, 단위 면적당 추진력과 흡인력 평균값의 계산결과와 실험결과를 비교하면 추진력의 실험치는 계산치의 약 87%, 흡인력의 실험치는 계산치의 98%였으며 흡인력은 추진력의 약 3.1배로 나타났고 있다.

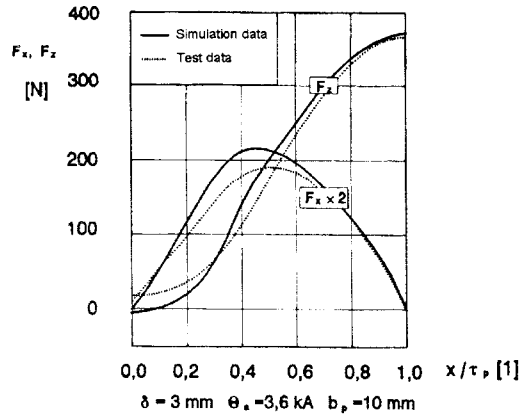


그림 8 이동자 위치에 따른 추진력과 흡인력

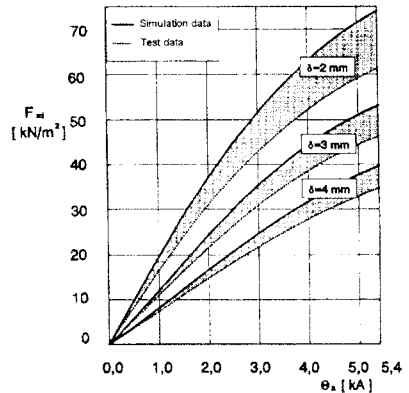


그림 9 공극과 기자력에 따른 추력밀도

5. 결 론

본 연구에서는 새로운 설계 개념을 도입한 횡축형 영구자석 여자 전동기의 이론을 소개하여 고효율화의 가능성을 제시하였으며, 고효율 전동기의 응용분야로 철도차량용 선형 전동기의 개념설계를 수행하여 기존 선형 유도 전동기를 사용할 경우보다 약 75% 이상을 경량화시킬 수 있는 가능성을 제시하였다. 설계된 영구자석 여자 횡축형 전동기의 전자기적 설계의 타당성을 검증하기 위해 축소형 시험모델을 제작하여 추진력과 흡인력을 검증하였다. 추진력의 실험치는 계산치의 87%, 흡인력의 실험치는 계산치의 98%로 나타났으며, 흡인력은 추진력의 약 3.1배로 나타났다.

(참 고 문 헌)

- [1] Weh, H. "Linear Electromagnetic Drives in Traffic Systems and Industry", The First International Symposium on Linear Drive for Industry Applications, Nagasaki(Japan), 1995.
- [2] Shoyama, Y., Ando, M. and Namikawa, H., "LIM driven subway railcar with small sectional area", International Conference on Maglev Transport '85, Yokohama, 1985.
- [3] 강도현, 방덕재, 김중무, "고출력 영구자석 여자 횡축형 선형전동기 설계에 관한 연구", '99 대한전기학회 전기기기연구회 및 전기철도연구회 춘계 합동학술발표회 논문집, PP.53-58, 1999.
- [4] 김봉섭, 정현갑, 조홍제, "선형유도전동기의 동특성에 대한 실험적 연구(II)", '97 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 제 A권, PP.57-63, 1997.